

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б.Н. Ельцина»

*На правах рукописи*



**Никитин Александр Дмитриевич**

**ВЛИЯНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКЕ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ  
ГАЗИФИКАЦИЕЙ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре «Тепловые электрические станции» Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**РЫЖКОВ Александр Филиппович**

Официальные оппоненты: **КУЗНЕЦОВ Гений Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск, профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики;

**РЯБОВ Георгий Александрович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», г. Москва, заведующий лабораторией специальных котлов отделения парогенераторов и топочных устройств;

**ЛАВРОВ Владислав Васильевич**, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии Департамента металлургии и металловедения Института новых материалов и технологий.

Защита состоится «04» июня 2021 года в 12:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.05.12 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2172>.

Автореферат разослан «29» апреля 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аронсон Константин Эрленович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Рост населения Земли и стремление к повышению качества жизни приводит к непрерывному увеличению потребления энергии. Согласно отчету *BP Statistical Review of World Energy* за 2019 г., за последние 10 лет ежегодный мировой прирост выработки электрической энергии составил 2,5 %. В России ежегодный прирост составляет около 0,5 % (Отчет о функционировании ЕЭС России, 2019). Несмотря на бурное развитие возобновляемых источников энергии, их доля в энергетическом мировом балансе остается менее 10 %, а основная часть энергии вырабатывается на электростанциях, сжигающих ископаемое топливо. При этом образуется значительное количество углекислого газа, который способствует глобальному потеплению. Для снижения влияния на климат глобальной задачей является повышение эффективности выработки энергии из ископаемого топлива. Большая часть энергии (около 40 % от мирового потребления) вырабатывается на угольных ТЭС. При обычном сжигании угля в топках котлов образуется значительно больше выбросов вредных веществ (оксиды серы и азота, твердые частицы, тяжелые металлы), чем при сжигании других видов ископаемых топлив. Однако значение запасов угля на порядок больше, чем запасов нефти и газа. Поэтому, несмотря на тенденцию сокращения доли угольных ТЭС в развитых странах, отказаться от использования угля не представляется возможным.

Перспективной технологией производства энергии из угля, обеспечивающей наиболее высокую эффективность и минимальное негативное воздействие на окружающую среду, является парогазовый цикл с внутрицикловой газификацией твердого топлива (ПГУ-ВЦГ). Однако, несмотря на значительное количество проведенных исследований и наличие коммерческих установок, стоимость вырабатываемой на ПГУ-ВЦГ электроэнергии остается высокой, что требует дальнейшего совершенствования технологии и поиска новых научно-технических решений. Тема работы соответствует Перечню приоритетных направлений развития науки, технологии и техники РФ (п. 8), а также Перечню критических технологий РФ (п. 27).

**Степень разработанности темы исследования.** Фундаментальные исследования процессов газификации твердого топлива в разное время проводили Предводителей А. С., Канторович Б. В., Кнорре Г. Ф., Хитрин Л. Н., Франк-Каменецкий Д. А., Померанцев В. В., Бабий В. И., Хзмалян Д. М., Головина Е. С., *Miura K., Solomon P. R., Bhatia S. K., Molina A., Niksa S.*, и др. Прикладные исследования поточной воздушной газификации угля выполняли *Hara S., Watanabe H., Chen C., Choniem A.*, паровоздушной газификации в плотном и кипящем слое, а также в потоке – Колодцев Х. И., Баскаков А. П., Майстренко А. Ю., Дубинин А. М., Бурдуков А. П., Степанов С. Г., Исламов С. Р., Мингалеева Г. Р., Сучков С. И., Загрутдинов Р. Ш., Рыжков А. Ф., Донской И. Г., *Upadhyay D., Wang D., Pinto F., Zhou H., Tian Y., Xiao R., Ju F., Oh G., Rianza J.* Исследование сухой горячей сероочистки синтез-газа проводили Сучков С. И., Строков А. А., Рыжков А. Ф., Тупоногов В. Г., *Gupta R., Kobayashi M., Meng X., Girard V., Ko T., Sun J., Jun H., Fan H.* Исследования цикла ПГУ-ВЦГ с воздушной газификацией угля проводили *Giuffrida A.*, Сучков С. И., Рыжков А. Ф. В работах указанных авторов исследовались отдельные режимы газификации твердого топлива и сероочистки синтез-газа, как правило в ограниченном диапазоне варьирования режимных параметров и без системного анализа влияния паросодержания на процессы в узле ВЦГ и на работу ПГУ-ВЦГ в целом.

**Цель исследования:** получить новые фундаментальные знания о физико-химических особенностях первичного взаимодействия водяного пара с частицами топлива в быстротекущем поточном процессе паровоздушной газификации и вторичного взаимодействия синтез-газа и водяного пара с частицами сорбента в узле сероочистки, а также количественно оценить влияние добавки водяного пара на вход ПГУ-ВЦГ (в газогенератор) на ее работу.

**Задачи исследования:**

1. Провести экспериментальное исследование влияния добавки водяного пара на процесс воздушной газификации каменного угля в поточной установке.
2. Разработать математическую модель двухступенчатого поточного газогенератора, верифицировать ее и определить зависимость параметров процесса

(состав синтез-газа, температура на выходе из газогенератора, степень конверсии угля, химический КПД газогенератора) от добавки водяного пара в воздушное дутье.

3. Провести экспериментальное исследование влияния состава синтез-газа (добавки водяного пара) на термическую устойчивость сорбента для горячей сероочистки и определить кинетические константы реакций разложения сорбента.

4. Выполнить термодинамическую оценку остаточного содержания соединений серы в синтез-газе и определить зависимость температуры горячей сероочистки от добавки водяного пара в газогенератор с учетом условий термической устойчивости сорбента и остаточного содержания соединений серы.

5. Выполнить оценку влияния добавки водяного пара на вход ПГУ-ВЦГ на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ.

#### **Научная новизна:**

1. Проведены экспериментальные исследования паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля марки Д в поточном реакторе в широком диапазоне соотношения пар/уголь при постоянном времени пребывания частиц угля в реакторе.

2. Предложена и верифицирована одномерная модель двухступенчатого поточного газогенератора, учитывающая внутреннее реагирование, изменение размера частиц угля в ходе газификации, зависимость порядка реакции паровой газификации от концентрации  $H_2O$ , распределение частиц угля по размерам и рециркуляцию коксозольного остатка (КЗО).

3. Экспериментально определены кинетические константы реакций разложения сорбента на основе оксида цинка при взаимодействии с компонентами синтез-газа, предложена модель для расчета предельной температуры процесса горячей сероочистки синтез-газа по условию термической устойчивости сорбента, и получены новые данные по предельной температуре сероочистки.

4. Выполнена количественная оценка влияния добавки водяного пара на вход в ПГУ-ВЦГ на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ с воздушной газификацией угля и горячей сероочисткой синтез-газа.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Полученные экспериментальные результаты вносят вклад в понимание физико-химических процессов, происходящих при газификации твердого топлива и сероочистке синтез-газа, и могут быть использованы при верификации результатов математического моделирования указанных процессов. В результате экспериментальных и расчетных исследований выявлен немонотонный характер зависимости эффективности газификации твердого топлива от добавки водяного пара в газогенератор, что приводит к немонотонному изменению параметров всех последующих узлов ПГУ-ВЦГ. Выявлены диапазоны добавки водяного пара, оказывающие положительный эффект на процессы газификации угля, сероочистки синтез-газа и эффективность ПГУ-ВЦГ в целом.

Адаптированная и верифицированная модель двухступенчатого поточного газогенератора позволяет с использованием результатов лабораторных анализов проб твердого топлива рассчитать режимные параметры паровоздушной и парокислородной газификации твердого топлива. Полученные зависимости режимных параметров ПГУ-ВЦГ от добавки водяного пара на вход ПГУ-ВЦГ (в газогенератор) могут быть использованы при разработке перспективной ПГУ для производства электрической и тепловой энергии с высокой эффективностью и минимальными выбросами вредных веществ.

Результаты исследования влияния водяного пара на поточную газификацию кузнецкого каменного угля получены и использованы в рамках НИР по гранту РФФИ №19-38-50071. Одномерная модель газогенератора использована при разработке опытно-промышленной печи для производства активированного угля методом паровоздушной газификации древесного угля.

**Методология и методы исследования.** В работе используются как общенаучные (теоретические и эмпирические), так и специальные методы исследования. Применяются методы анализа, синтеза, аналогии, сравнения и обобщения. Используются основные теоретические положения термодинамики, тепло- и массообмена и физической химии. Физико-химические процессы при газификации твердого топлива и сероочистке синтез-газа рассматриваются

применительно к ПГУ-ВЦГ последовательно и совместно. В результате объективно оценивается влияние подачи водяного пара на вход ПГУ-ВЦГ (в газогенератор) на ее эффективность. При исследовании паровоздушной газификации и горячей сероочистки проводятся поисковые эксперименты в широком диапазоне режимных параметров, затем с использованием математических моделей определяются зависимости параметров процесса от добавки водяного пара, которые в дальнейшем применяются при расчете ПГУ-ВЦГ. Экспериментальные исследования газификации угля выполнены на поточном реакторе ИТ СО РАН. Экспериментальные исследования разложения сорбента при взаимодействии с компонентами синтез-газа выполнены методом термогравиметрического анализа на приборе *NETZSCH STA 449 F3* с масс-спектрометрическим анализом продуктов реакции на квадрупольном масс-спектрометре *QMS 403C Aëolos*. Модель газогенератора основана на расчете скорости гетерогенных реакций по диффузионно-кинетической теории и состава газа по термодинамическому равновесию. Расчет цикла ПГУ-ВЦГ проводится на основе материального и теплового баланса и теории термодинамических циклов. Расчеты выполнены в программе *Microsoft Excel*.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментального исследования влияния добавки водяного пара на развитие процесса воздушной газификации кузнецкого каменного угля в поточной установке.
2. Адаптированная и верифицированная модель двухступенчатого поточного газогенератора промышленного масштаба.
3. Результаты расчетного исследования влияния добавки водяного пара на процесс газификации каменного угля в промышленном поточном газогенераторе.
4. Результаты экспериментального исследования влияния состава синтез-газа на термическую устойчивость сорбента на основе оксида цинка и расчетная зависимость температуры процесса сероочистки синтез-газа от его состава.
5. Результаты расчетного исследования влияния подачи водяного пара в газогенератор на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ.

**Личный вклад автора.** Общее направление работы задавалось совместно с научным руководителем, проф., д.т.н. Рыжковым А. Ф. Автором лично проведен анализ научно-технической литературы, выполнено планирование, проведение, обработка и анализ результатов экспериментов по паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля в модернизированной по плану автора поточной установке ИТ СО РАН и по разложению сорбента на основе оксида цинка при взаимодействии с компонентами синтез-газа на приборе термогравиметрического анализа *NETZSCH STA 449 F3* УрФУ, выполнена модификация и верификация одномерной модели поточного двухступенчатого газогенератора, проведены расчеты паровоздушной газификации угля, сероочистки синтез-газа и цикла ПГУ-ВЦГ, выполнен анализ полученных результатов. Обсуждение результатов и формулирование окончательных выводов проводилось совместно с научным руководителем.

**Степень достоверности результатов исследования.** При выполнении расчетов использованы общепринятые методики и признанные эмпирические параметры и константы. При проведении экспериментальных исследований применялись апробированные методики измерений и высокоточные средства измерений, прошедшие метрологическую поверку, выполнялись параллельные серии экспериментов. Хорошее соответствие результатов расчетов и экспериментов при сопоставлении с литературными данными показывает высокую достоверность полученных результатов.

**Апробация результатов.** Результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2017, 2018, 2019), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2017, 2019), Международной молодежной научной конференции «Физика. Технологии. Инновации» (Екатеринбург, 2018, 2019), Всероссийской специализированной научно-практической конференции молодых специалистов (с международным участием) «Современные технологии в энергетике» (Москва, 2018), VII Международном российско-казахстанском

симпозиуме «Углекислота и экология Кузбасса» (Кемерово, 2018), Седьмой российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018), X Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2018), Всероссийской молодежной конференции с международным участием «Системные исследования в энергетике» (Иркутск, 2019), *5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control* (Новосибирск, 2019), Всероссийской конференции XXXVI Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 2020), XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (Москва, 2020).

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 10 научных работ в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ и входящих в международные системы цитирования *Scopus* и *Web of Science*. Получен 1 патент РФ на полезную модель.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** В рамках диссертационной работы проводились экспериментальные и теоретические исследования процессов совместного переноса тепла и массы в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси каменного угля, воздуха и водяного пара, а также компонентов синтез-газ и оксида цинка; выполнялось исследование термодинамических процессов и циклов применительно к установкам производства и преобразования энергии.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 191 источник, и девяти приложений. Диссертация изложена на 196 страницах, включает 66 рисунков и 46 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, структура работы.

В первой главе представлен обзор опубликованных в литературе результатов исследований по трем направлениям: технологические решения по совершенствованию ПГУ-ВЦГ, влияние водяного пара на процесс газификации твердого топлива и на процесс горячей сероочистки синтез-газа. Повышению эффективности ПГУ-ВЦГ способствует увеличение химического КПД газогенератора  $\eta_{\text{хим}}$ , перевод газогенератора с кислородного дутья на воздушное, повышение температуры синтез-газа перед ГТУ за счет применения горячей сухой сероочистки, применение ГТУ перспективных параметров для искусственных газов (класс  $F$ ,  $TIT = 1400$  °C). Влияние добавки водяного пара в воздушный газогенератор на показатели ПГУ-ВЦГ в целом не рассматривалось.

Водяной пар при подаче на вход в ПГУ-ВЦГ (в газогенератор) влияет на работу и конструктив всех ее элементов (рисунок 1). Влияние водяного пара на  $\eta_{\text{хим}}$  определяется соотношением противоположных по знаку факторов. Положительными факторами являются увеличение концентрации вступающих в реакции газификации угля  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$  (за счет реакции водяного сдвига), а также ускорение газификации топлива за счет более высокой реакционной способности  $\text{H}_2\text{O}$  по сравнению с  $\text{CO}_2$ .

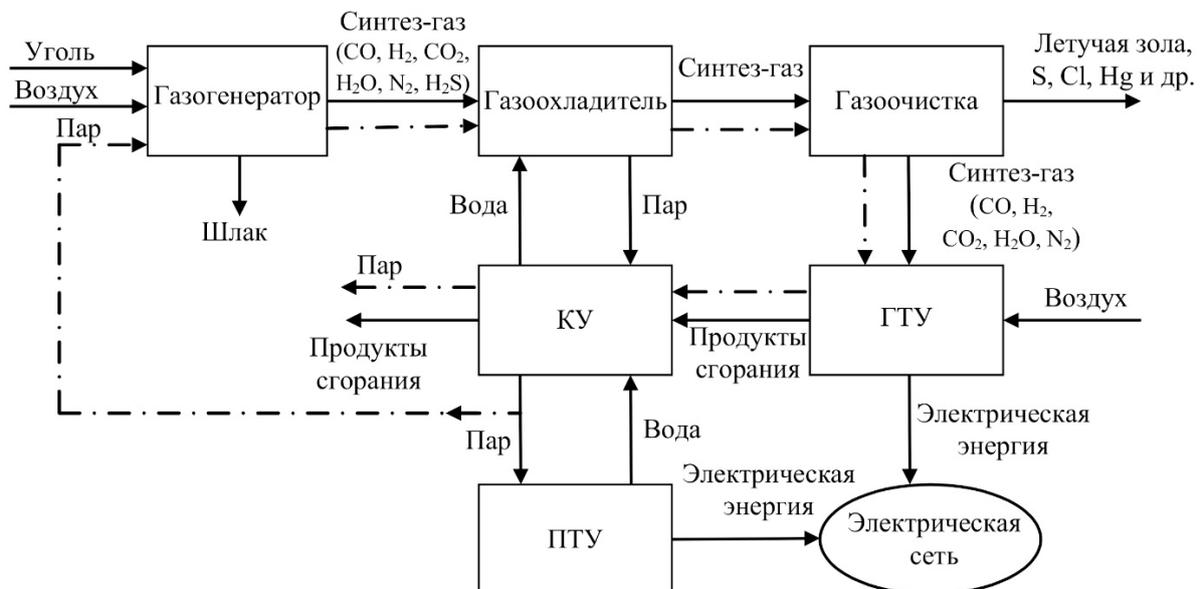


Рисунок 1 – Принципиальная схема ПГУ-ВЦГ с подачей пара в газогенератор

Отрицательными факторами являются замедление реакций газификации по причине снижения температуры в газогенераторе за счет высокой теплоемкости  $\text{H}_2\text{O}$ , а также уменьшение времени пребывания частиц топлива в газогенераторе за

счет увеличения расхода газовой фазы. Согласно литературным данным, подача пара в газогенератор как правило увеличивает  $\eta_{\text{хим}}$ , однако количественные оценки значительно отличаются. Добавка пара в газогенератор увеличивает соотношение  $\text{H}_2/\text{CO}$  в синтез-газе, что согласно литературным данным снижает образование  $\text{NO}_x$  при его сжигании в камере сгорания ГТУ.

В узле сероочистки при увеличении содержания  $\text{H}_2\text{O}$  в синтез-газе с одной стороны замедляется целевая реакция поглощения соединений серы и увеличивается их равновесная концентрация на выходе из узла сероочистки (в литературе приведены данные для синтез-газов парокислородной газификации твердого топлива), но с другой стороны блокируются реакции взаимодействия сорбента с  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  (за счет снижения их концентрации и смещения термодинамического равновесия), что должно увеличивать термическую устойчивость сорбента и температурный диапазон сероочистки (надежные данные по термической устойчивости сорбента в литературе отсутствуют).

В случае снижения температуры на выходе из газогенератора и роста температуры сероочистки при добавке пара уменьшается перепад температур и размеры газоохладителя. Увеличение содержания водяного пара в продуктах сгорания синтез-газа повышает удельную работу и мощность ГТУ, но одновременно увеличиваются температура на выходе из ГТУ, паропроизводительность и размеры котла-утилизатора, а также потери с дымовыми газами (теплота конденсации подаваемого на вход ПГУ-ВЦГ пара). Отбор пара для подачи на вход ПГУ-ВЦГ уменьшает мощность паротурбинной установки и размеры конденсатора. Для оценки влияния подачи водяного пара на вход в ПГУ-ВЦГ на ее эффективность и материалоемкость требуется достоверно определить параметры ключевых процессов – газификации угля и сероочистки синтез-газа. С учетом изложенного сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** представлено экспериментальное исследование влияния добавки водяного пара на развитие процесса воздушной газификации кузнецкого каменного угля марки Д (таблица 1). Эксперименты проводились на модернизированной для целей исследования поточной установке ИТ СО РАН

(рисунок 2), с использованием двух типов помола угля: на шаровой барабанной мельнице (ШБМ) ( $R_{90} = 17,7\%$ ,  $R_{200} = 1,46\%$ , средний диаметр частиц 49,5 мкм) и на дезинтеграторе ( $R_{90} = 21,5\%$ ,  $R_{200} = 0,15\%$ , средний диаметр частиц 62,7 мкм).

Таблица 1 – Технический и элементный состав исследуемого угля

$W$ , %	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$C^{daf}$ , %	$H^{daf}$ , %	$O^{daf}$ , %	$N^{daf}$ , %	$S^{daf}$ , %
2	21	41	74,5	6,5	16,1	2,2	0,6

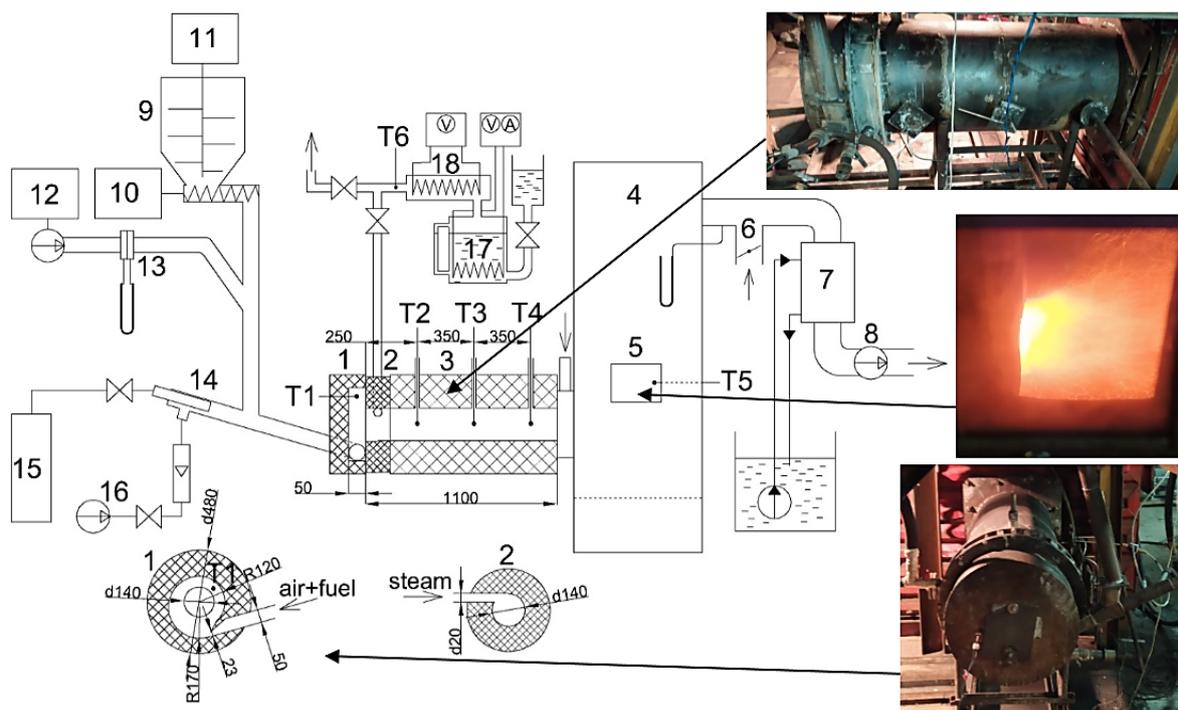


Рисунок 2 – Экспериментальная установка

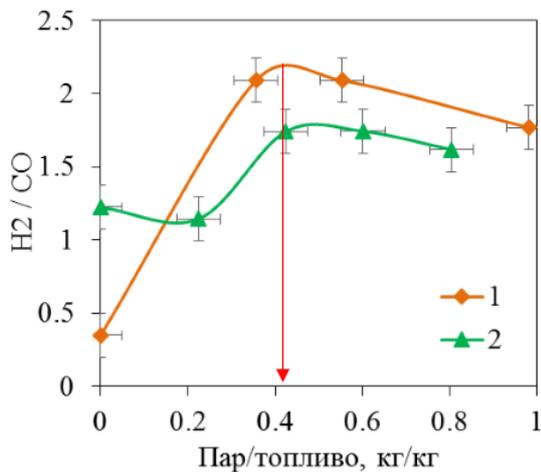
1 – улиточный завихритель, 2 – вставка для тангенциальной подачи водяного пара, 3 – реакционная камера, 4 – камера дожигания, 5 – смотровое окно, 6 – регулятор разряжения, 7 – центробежно-барботажный аппарат, 8 – дымосос, 9 – бункер топлива, 10 – шнековый питатель, 11 – мешалка, 12 – воздуходувка с частотным приводом, 13 – диафрагма для измерения расхода воздуха, 14 – запальная горелка, 15 – баллон с пропаном, 16 – растопочная воздуходувка, 17 – парогенератор, 18 – пароперегреватель

Программа экспериментов приведена в таблице 2. В первой серии применен обычный подход, когда пар добавляется при неизменных расходах угля и воздуха, что уменьшает время пребывания частиц угля в установке. Во второй серии поддерживалось постоянное время пребывания частиц за счет снижения расходов угля и воздуха при подаче пара. Независимо от подхода, добавка водяного пара к воздушному дутью оказывает положительный эффект (рисунок 3). Зависимость  $\eta_{хим}$  от соотношения пар/уголь имеет немонотонный характер. В сериях 1 и 2 максимум  $\eta_{хим}$  достигается при практически одинаковом значении добавки пара

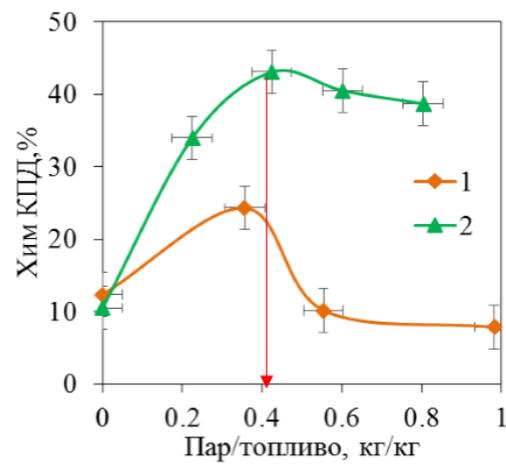
(около 0,4 кг/кг угля), но значительно различается характер изменения  $\eta_{\text{хим}}$  при увеличении добавки пара. Относительно низкие значения  $\eta_{\text{хим}}$  и высокие значения  $\text{H}_2/\text{CO}$  объясняются неполной конверсией угля вследствие ограниченной длины реакционной камеры. Достоверность полученных результатов подтверждается сходимостью материального и теплового балансов с невязкой менее 4 %.

Таблица 2 – Программа экспериментов на поточной установке

Серия 1 – помол на ШБМ				Серия 2 – помол на дезинтеграторе			
№ реж.	Уголь, кг/ч	Воздух, м <sup>3</sup> /ч (н.у.)	Пар, кг/ч	№ реж.	Уголь, кг/ч	Воздух, м <sup>3</sup> /ч (н.у.)	Пар, кг/ч
1	13,3	34	0	1	13,0	43,7	0,0
2	13,3	34	4,8	2	12,0	40,4	2,7
3	13,3	34	8,6	3	11,2	37,6	4,7
4	13,3	34	15,3	4	10,5	35,2	6,3
-	-	-	-	5	9,8	33,0	7,9



а)



б)

Рисунок 3 – Сопоставление отношения  $\text{H}_2/\text{CO}$  в синтез-газе (а) и химического КПД газогенератора (б) в сериях 1 (постоянный расход угля) и 2 (постоянное время пребывания)

Обработка данных серии 2 (рисунок 4) показала, что порядок реакции по  $\text{H}_2\text{O}$  изменяется от  $n=1$  (при  $\text{H}_2\text{O} < 15\%$  об., зона А) до  $n=0$  (при  $\text{H}_2\text{O} = 15\text{--}20\%$  об., зона Б), что хорошо коррелирует с данными П. Н. Галушко и Б. В. Канторовича (1958 г.) для индивидуальной частицы, Е. С. Головиной (1995 г.) и А. Н. Козлова (2016 г.) для тонкого плотного слоя.

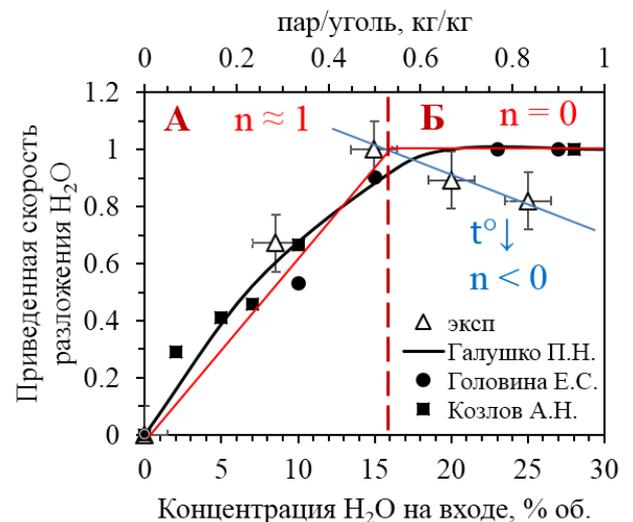
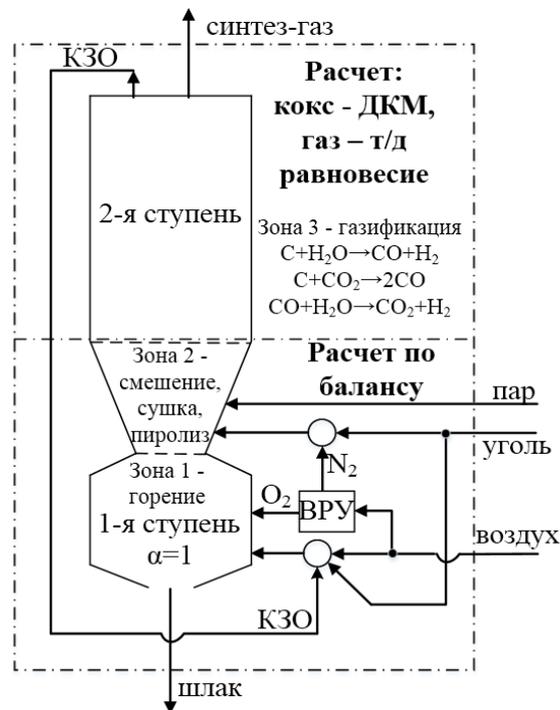


Рисунок 4 – Сопоставление результатов эксперимента с литературными данными

Формирование нулевого порядка реакции обусловлено блокирующим действием избытка водяного пара, что объяснено в работах Е. С. Головиной. Наблюдаемый в эксперименте отрицательный порядок реакции связан со снижением температуры на выходе из установки с 1170 до 1126 °С при увеличении добавки пара.

В третьей главе представлено расчетное исследование влияния добавки водяного пара на процесс воздушной газификации твердого топлива в промышленном двухступенчатом поточном газогенераторе типа МНИ с использованием модифицированной одномерной модели. За основу взята разработанная в ИСЭМ СО РАН кинетико-термодинамическая модель поточного газогенератора (Донской И. Г., 2013). В модифицированной модели расход угля в первую ступень (окислительная зона) рассчитывается по материальному балансу с учетом рециркуляции непрореагировавшего остатка угля с выхода газогенератора (рисунок 5). Состав газа во второй ступени (восстановительная зона) рассчитывается по термодинамическому равновесию. В отличие от модели ИСЭМ при расчете второй ступени учитывается полидисперсность угля (разбиением на три фракции: < 20 мкм, 20-100 мкм и > 100 мкм), а также изменение порядка реакции паровой газификации (по данным главы 2) и внутреннее реагирование по модели Е. Тиле (1939 г.):



Состав газа во второй ступени (восстановительная зона) рассчитывается по термодинамическому равновесию. В отличие от модели ИСЭМ при расчете второй ступени учитывается полидисперсность угля (разбиением на три фракции: < 20 мкм, 20-100 мкм и > 100 мкм), а также изменение порядка реакции паровой газификации (по данным главы 2) и внутреннее реагирование по модели Е. Тиле (1939 г.):

$$-\frac{1}{S_q} \cdot \frac{dN(A)}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{k_{диф}} + \frac{1}{k_{кин} \cdot \left( \varepsilon \cdot \frac{S_{nop}}{S_q} + 1 \right)}} \cdot C_A = k_{eff} \cdot C_A \quad (1)$$

$$k_{диф} = \frac{Nu_D \cdot D_{Ag}}{d}, k_s = k_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}}, \varepsilon = \frac{3}{\varphi} \cdot \left( \frac{1}{\tanh \varphi} - \frac{1}{\varphi} \right), \varphi = L \cdot \sqrt{\frac{k}{D_{Aeff}}} \quad (2)$$

где  $S_q$  – внешняя площадь поверхности частицы,  $m^2$ ,  $N_A$  – количество находящегося в газовой фазе реагента А вступившего в реакцию, моль,  $k_{диф}$  – коэффициент массопередачи диффузией, м/с,  $k_{кин}$  – отнесенная к внешней поверхности частицы константа скорости гетерогенной реакции, м/с,

$\varepsilon$  – фактор эффективности,  $S_{\text{пор}}$  – суммарная площадь поверхности пор в частице,  $\text{м}^2$ ,  $k_{\text{eff}}$  – эффективная константа скорости реакции,  $\text{м}/\text{с}$ ,  $C_A$  – концентрация реагента А в газовом потоке,  $\text{моль}/\text{м}^3$ ,  $\text{Nu}_D$  – диффузионный критерий Нуссельта,  $D_{Ag}$  – коэффициент диффузии реагента А в газовой фазе,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $d$  – диаметр частицы,  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель,  $\text{м}/\text{с}$ ,  $E_A$  – энергия активации,  $\text{кДж}/\text{моль}$ ,  $\varphi$  – модуль Тиле,  $L$  – длина поры,  $\text{м}$ ,  $k$  – отнесенная к объему поры константа скорости гетерогенной реакции,  $1/\text{с}$ ,  $D_{A\text{eff}}$  – эффективный коэффициент диффузии реагента А в порах,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

При расчете используются кинетические константы ( $E_A^{\text{H}_2\text{O}} = 252$   $\text{кДж}/\text{моль}$ ,  $E_A^{\text{CO}_2} = 271$   $\text{кДж}/\text{моль}$ ), полученные экспериментально японскими исследователями (*Watanabe H.*, 2006) в низкотемпературном (кинетическом) диапазоне. Расчетные значения константы скорости реакции  $k_{\text{eff}}$  по модели Тиле с подстановкой данных *Watanabe H.* по площади поверхности пор хорошо совпадают с  $k_{\text{eff}}$ , рассчитанными по экспериментальным кинетическим константам *Watanabe H.* для высокотемпературного диапазона и коррелируют с данными других исследователей (рисунок 6). Модифицированная модель газогенератора верифицирована по экспериментальным данным для газогенератора *МНИ* производительностью по углю 2 т/сут.

Проведены расчеты режимов паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля в действующем промышленном двухступенчатом газогенераторе *МНИ* производительностью по углю 1700 т/сут. при неизменной конструкции и варьировании соотношения пар/уголь при постоянном теплонапряжении по сечению. Для каждого исследованного помола угля (ШБМ и дезинтегратор) выполнены три серии расчетов: «проектный» режим (отношение рециркулируемый КЗО/уголь  $R \approx 0,15$   $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $\eta_{\text{хим}} \approx 75$  %), «пиролизный» режим ( $R \rightarrow \text{max}$ , в первую ступень газогенератора подается только КЗО) и «поточный» режим ( $R \rightarrow \text{min}$ , рециркуляция КЗО отсутствует). Добавка пара во всех случаях увеличивает соотношение  $\text{H}_2/\text{CO}$  в синтез-газе. Зависимость  $\eta_{\text{хим}}$  от соотношения пар/уголь носит немонотонный характер (рисунок 7, а). Положение максимума  $\eta_{\text{хим}}$

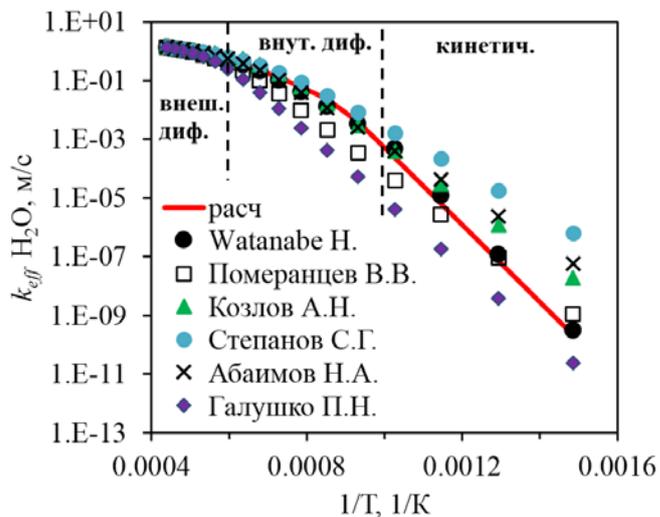


Рисунок 6 – Сопоставление расчета  $k_{\text{eff}} \text{H}_2\text{O}$  при различных кинетических константах (давление 2,6 МПа, размер частицы 40 мкм)

контролируется кинетикой паровой газификации (переходом от  $n=1$  к  $n=0$ ). Для анализа результатов расчета значения контрольных параметров приводятся к значениям при воздушной газификации (рисунок 7, б). Увеличение  $\eta_{\text{хим}}$  в зоне А (порядок реакции газификации по  $\text{H}_2\text{O}$   $n=1$ ) обусловлено ускорением газификации и уменьшением коэффициента расхода воздуха  $\alpha$ . В зоне Б ( $n=0$ ) добавка пара не ускоряет газификацию и снижает температуру, что приводит к увеличению  $\alpha$ , сокращению времени пребывания угля в газогенераторе и уменьшению  $\eta_{\text{хим}}$ .

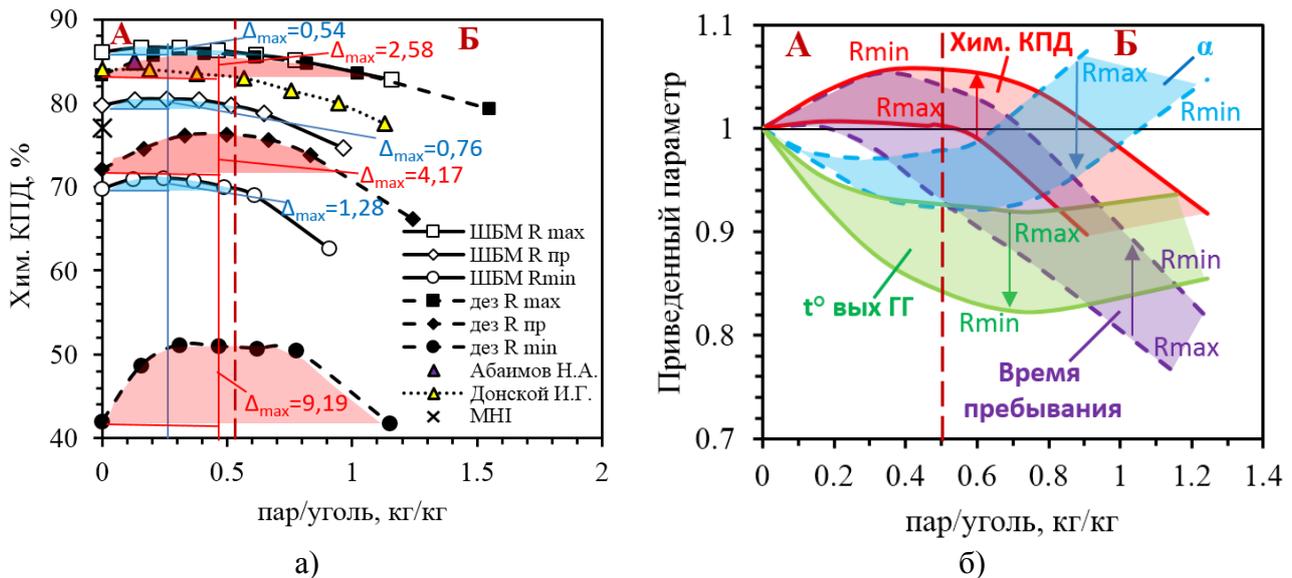
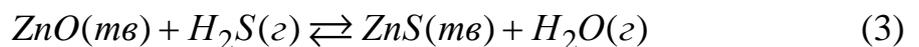
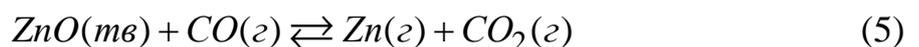
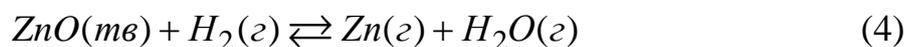


Рисунок 7 – Зависимость химического КПД (а) и приведенных параметров газогенератора (б) от соотношения пар/уголь в различных режимах газификации угля ( $R$  – отношение КЗО/уголь)

В четвертой главе рассмотрено влияние изменения состава синтез-газа на рабочую температуру сероочистки при использовании сорбента на основе оксида цинка. Процесс сероочистки синтез-газа описывается следующей реакцией:



Параллельно проходит разложение сорбента и возгонка цинка по реакциям:



Для определения предельной температуры сероочистки по условию термической устойчивости сорбента методом термогравиметрического анализа на приборе *NETZSCH STA 449 F3* (рисунок 8) проведены экспериментальные исследования кинетики реакций взаимодействия оксида цинка с  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$  в средах  $\text{H}_2$ -Ar,  $\text{CO}$ -Ar,  $\text{H}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ - $\text{CO}_2$  при варьировании их состава. Для контроля состава среды разработана методика обработки выходного сигнала масс-спектрометра.

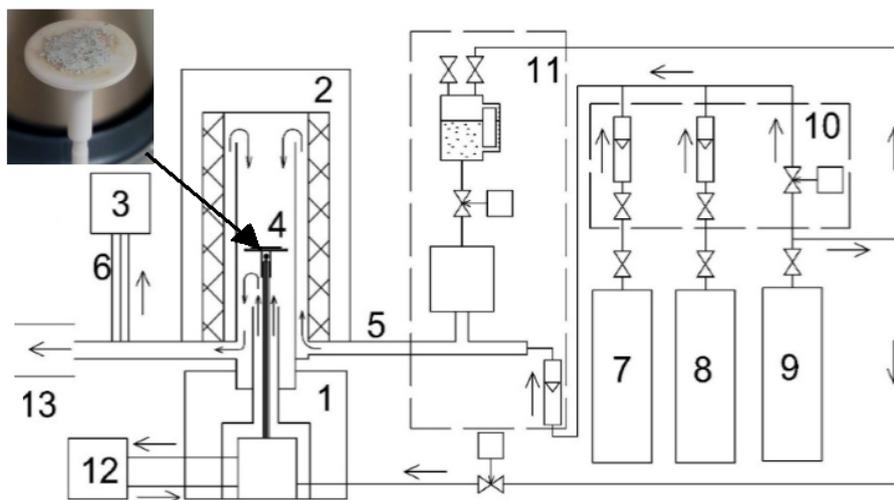


Рисунок 8 – Схема комплекса синхронного термического анализа с масс-спектрометрией  
 1 – блок весов, 2 – печь, 3 – масс-спектрометр, 4 – держатель пробы, 5 – обогреваемая линия для подачи газов, 6 – обогреваемая линия для отбора пробы газов на выходе из печи, 7, 8 – баллоны с газами, 9 – баллон с аргоном, 10 – приставка *PulseTA*, 11 – блок парогенератора, 12 – термостат, 13 – вытяжная система

Для расчета кинетических констант используется интервал температур, соответствующий началу изменения массы навески сорбента, в котором скорость изменения массы определяется скоростью химической реакции. Обработка экспериментальных данных осуществляется по формуле:

$$\ln \left( \frac{X_{\tau} - X_{\tau+\Delta\tau}}{\Delta\tau} \cdot \frac{1}{(1 - X_{\tau})^{2/3}} \right) = \ln \left( \frac{\mu_c \cdot S_0}{m_0 - m_f} \cdot \frac{p_n \cdot P}{R \cdot T} \cdot k_0 \right) - \frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

где  $X$  – степень конверсии сорбента,  $\mu_c$  – молярная масса сорбента, кг/моль,  $S_0$  – площадь поверхности сорбента в начальный момент времени,  $m^2$ ,  $r$  – радиус частицы сорбента, м,  $p_n$  – объемная доля газа,  $k_0$  и  $E_A$  – предэкспоненциальный множитель и энергия активации.

По экспериментальным данным (рисунок 9) рассчитываются значения левой части формулы (6) и строится ее зависимость от температуры в координатах Аррениуса. Методом наименьших квадратов определяются значения слагаемых в правой части формулы (6), по которым рассчитываются  $k_0$  и  $E_A$ . в виде:  $k_0^{H_2} = f(H_2O)$ ,  $E_A^{H_2} = f(H_2O)$ ,  $k_0^{CO} = f(CO_2)$ ,  $E_A^{CO} = f(CO_2)$ .

Расчетная скорость разложения сорбента определяется по выражению:

$$\frac{dX}{d\tau} = \frac{3 \cdot \mu_c \cdot P}{\rho \cdot r \cdot R \cdot T} \cdot \left( p_{H_2} \cdot k_0^{H_2}(H_2O) \cdot e^{-\frac{E_A^{H_2}(H_2O)}{R \cdot T}} + p_{CO} \cdot k_0^{CO}(CO_2) \cdot e^{-\frac{E_A^{CO}(CO_2)}{R \cdot T}} \right) \quad (7)$$

Предельная температура сероочистки по условию термической устойчивости сорбента определяется при решении уравнения:  $dX/d\tau (T^{терм}) = 0,0001$ .

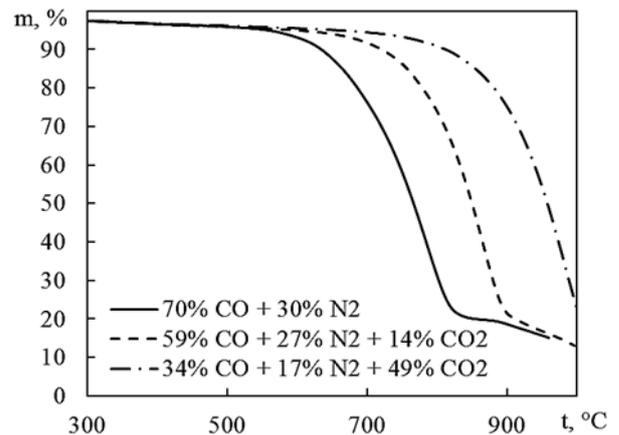
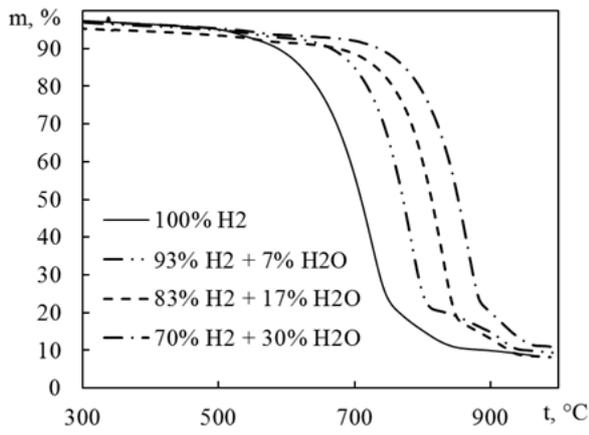


Рисунок 9 – Кривые убыли массы сорбента в средах H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (а) и CO-CO<sub>2</sub> (б)

Для определения температуры сероочистки по условию остаточной концентрации H<sub>2</sub>S в синтез-газе проведены термодинамические расчеты зависимости равновесного состава газа на выходе из узла сероочистки от температуры и содержания H<sub>2</sub>O. Получена зависимость предельной температуры сероочистки  $T^{H_2S} = f(H_2O)$ , при которой остаточное содержание H<sub>2</sub>S в синтез-газе равно допустимому значению для ПГУ-ВЦГ.

Предельная температура сероочистки определяется наименьшим значением:

$$T = \min(T^{терм}, T^{H_2S}) \quad (8)$$

На рисунке 10 показаны результаты расчета предельной температуры сероочистки для полученных при расчете газогенератора МНИ составов синтез-газа.

Во всех случаях температура сероочистки определяется термической устойчивостью сорбента, основной прирост которой приходится на зону А (порядок реакции газификации по H<sub>2</sub>O  $n=1$ ). Термодинамическая оценка температуры сероочистки возможна только при значительном содержании H<sub>2</sub>O (более 20 % об.), характерном для газогенераторов с мокрой топливоподачей (ВУС).

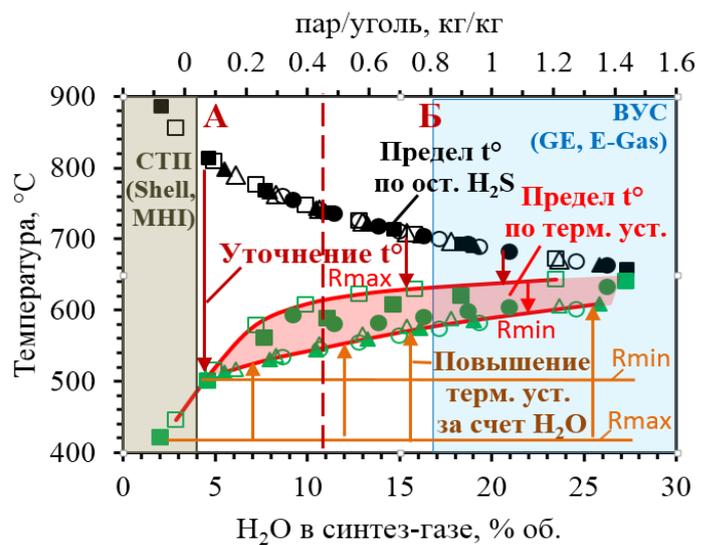


Рисунок 10 – Зависимость предельной температуры сероочистки от содержания H<sub>2</sub>O в синтез-газе (для режимов газификации по рисунку 7)

В пятой главе выполнена количественная оценка влияния водяного пара на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ. Предложена методика термодинамического расчета цикла ГТУ с учетом охлаждения лопаток и зависимости температуры продуктов сгорания на входе в газовую турбину от состава синтез-газа. Методика расчета энергетической части ПГУ-ВЦГ верифицирована по литературным данным *Giuffrida A. (2011)*. С использованием результатов расчета процессов газификации (глава 3) и сероочистки (глава 4) выполнены расчеты ПГУ-ВЦГ с двухступенчатым газогенератором *MHI*, горячей сероочисткой синтез-газа, ГТУ марки *Siemens SGT5-4000F* и трехконтурным котлом-утилизатором. Для анализа результатов расчета значения контрольных параметров приводятся к значениям при воздушной газификации. Зависимость КПД-нетто ПГУ-ВЦГ от добавки водяного пара в газогенератор имеет немонотонный характер (рисунок 11, а), что объясняется сложением немонотонного изменения  $\eta_{хим}$  и увеличения температуры сероочистки. Максимум КПД-нетто ПГУ-ВЦГ достигается при несколько меньших добавках пара, чем максимум  $\eta_{хим}$ . Увеличение мощности ГТУ при добавке пара компенсируется увеличением потерь энергии с теплотой конденсации пара в дымовых газах и снижением мощности ПТУ (рисунок 11, б), изменение КПД-нетто ПГУ-ВЦГ при добавке пара определяется снижением затрат на собственные нужды в зоне А (порядок реакции газификации по  $H_2O$   $n=1$ ) и увеличением затрат в зоне Б ( $n=0$ ).

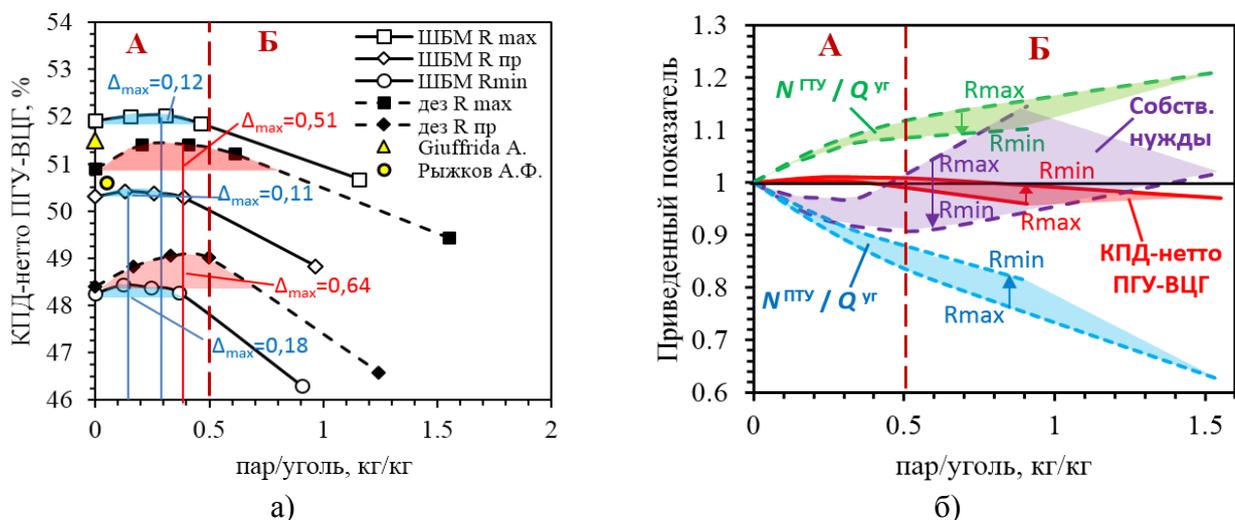


Рисунок 11 – Зависимость КПД-нетто (а) и приведенных показателей эффективности ПГУ-ВЦГ (б) от соотношения пар/уголь на входе в ПГУ-ВЦГ ( $R$  – отношение КЗО/уголь в газогенераторе)

Заметное повышение температуры сероочистки (на 200 °С) при добавке пара в пиролизном режиме газификации приводит к резкому уменьшению перепада температуры синтез-газа и выработки пара в газоохладителе (в 2 раза) в зоне А, что снижает расход пара в ПТУ. Это приводит к сокращению материалоемкости указанных узлов, и, несмотря на незначительное (в 1,2 раза) увеличение выработки пара и размеров котла-утилизатора, уменьшает общую материалоемкость и капитальные затраты на ПГУ-ВЦГ (рисунок 12, а). В поточных режимах газификации при добавке пара в зоне А перепад температуры в газоохладителе остается высоким, снижение материалоемкости газоохладителя и ПТУ незначительно, при этом из-за снижения теплоты сгорания синтез-газа  $\alpha$  камеры сгорания ГТУ снижается, что резко увеличивает содержание  $H_2O$  и теплоемкость продуктов сгорания, и как следствие – выработку пара в котле утилизаторе. В результате капитальные затраты на ПГУ-ВЦГ в зоне А увеличиваются.

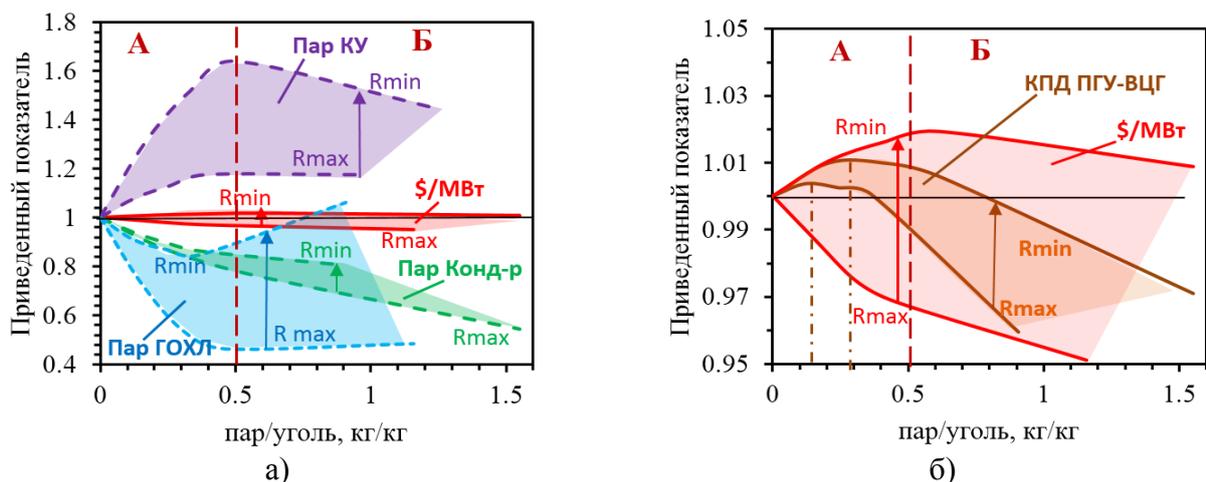


Рисунок 12 – Приведенные показатели материалоемкости ПГУ-ВЦГ (а) и сопоставление приведенных КПД-нетто и капитальных затрат на ПГУ-ВЦГ (б)

В зоне Б происходит снижение капитальных затрат на ПГУ-ВЦГ за счет значительного уменьшения расхода пара в ПТУ и ее материалоемкости. Сопоставление КПД-нетто и капитальных затрат на ПГУ-ВЦГ (рисунок 12, б) показывает, что добавка пара в зоне А обеспечивает снижение капитальных затрат до 3 % отн. при неизменном КПД. С учетом высокой стоимости ПГУ-ВЦГ это приводит к заметному экономическому эффекту.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное исследование влияния водяного пара на процесс поточной воздушной газификации каменного угля и на процесс сухой горячей

сероочистки синтез-газа с применением сорбента на основе оксида цинка. Выполнены экспериментальные исследования для уточнения фундаментальных зависимостей и расчетные исследования для количественной характеристики параметров процессов применительно к парогазовой установке с внутрицикловой газификацией твердого топлива. С использованием полученных результатов проведена количественная оценка влияния добавки водяного пара в газогенератор на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ.

Получены следующие основные результаты:

1. Проведено экспериментальное исследование влияния добавки водяного пара на процесс воздушной газификации кузнецкого каменного угля в поточной установке. В исследованных режимах добавка пара оказывает положительный эффект: увеличивает степень конверсии углерода в 1,5 раза, теплоту сгорания синтез-газа в 1,8–2,2 раза, содержание водорода в синтез-газе в 1,5–2 раза. Достоверность полученных результатов подтверждается сходимостью материальных и тепловых балансов. Выявлено, что скорость поточной паровой газификации угля имеет первый порядок по водяному пару при его концентрации менее 15–20 % об. и нулевой порядок при большей концентрации, что совпадает с классическими литературными данными для индивидуальной частицы и плотного слоя, ограничивает положительный эффект при добавке пара в газогенератор и требует учета при расчете паровоздушной газификации твердых топлив.

2. Разработана одномерная модель для расчета паровоздушной газификации твердого топлива в двухступенчатом поточном газогенераторе, учитывающая распределение частиц угля по размерам, реагирование внутри пор, изменение размера частиц в ходе газификации, рециркуляцию коксозольного остатка с выхода газогенератора. При расчете используется полученная зависимость порядка реакции паровой газификации от концентрации  $H_2O$ . Значения используемых при расчете кинетических констант обоснованы при специально проведенных расчетах константы скорости газификации топлива по литературным данным.

Определены зависимости параметров процесса паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля в промышленном двухступенчатом газогенераторе *МНИ* от добавки пара для двух типов помола (тонкий влажный и грубый сухой) и трех режимов: «проектный», «пиролизный» (максимально возможная рециркуляция коксозольного остатка) и «поточный» (полная конверсия угля, отсутствует рециркуляция КЗО). Добавка пара уменьшает содержание СО в синтез газе

в 2–3 раза, содержание  $H_2$  увеличивается в 1,2–2,5 раза при небольших добавках пара, обеспечивающих первый порядок реакции паровой газификации по  $H_2O$ , и уменьшается при переходе к нулевому порядку реакции при больших добавках пара. Зависимость химического КПД газогенератора от соотношения пар/уголь носит немонотонный характер. Положение максимума контролируется кинетикой паровой газификации (изменением порядка реакции от первого до нулевого), для исследуемого угля достигается при 0,3–0,5 кг пара/кг угля. Увеличение химического КПД составляет 0,5–9 % абс. в зависимости от режима работы газогенератора.

3. Проведено экспериментальное исследование термической устойчивости сорбента для горячей сероочистки сорбента (оксида цинка  $ZnO$ ) в средах  $H_2$ -Ar,  $CO$ -Ar,  $H_2$ - $H_2O$ ,  $CO$ - $CO_2$  методом термогравиметрического анализа и получены зависимости кинетических констант реакций взаимодействия  $ZnO$  с  $H_2$  и  $CO$  от состава синтез-газа. Показано, что в средах  $H_2$ -Ar,  $CO$ -Ar скорость реакции разложения сорбента имеет первый порядок по концентрации  $H_2$  и  $CO$ .

4. Выполнен термодинамический расчет зависимости остаточного содержания соединений серы в синтез-газе от температуры и добавки пара.

Определена предельная температура процесса сероочистки по условиям термической устойчивости сорбента и допустимого остаточного содержания соединений серы для составов синтез-газа, полученных при расчете паровоздушной газификации кузнецкого каменного угля. Во всех случаях температура сероочистки определяется термической устойчивостью сорбента, которая значительно увеличивается (на 200 °C) в диапазоне добавки пара, обеспечивающей первый порядок реакции газификации по  $H_2O$ . Наибольший эффект при добавке пара достигается в пиролизном режиме газификации, где вследствие относительно низкой температуры на выходе из газогенератора (около 800 °C) за счет реакции водяного сдвига увеличивается концентрация  $CO_2$  в синтез-газе, что препятствует разложению сорбента при взаимодействии с  $CO$ .

5. Выполнена оценка влияния добавки водяного пара на вход ПГУ-ВЦГ (в газогенератор) на эффективность и материалоемкость ПГУ-ВЦГ с двухступенчатым газогенератором *МНИ*, горячей сероочисткой синтез-газа, ГТУ марки *Siemens SGT5-4000F* и трехконтурным котлом-утилизатором при работе на кузнецком каменном угле с использованием всех полученных результатов. Увеличение КПД-нетто ПГУ-ВЦГ при добавке пара в газогенератор имеет

немонотонный характер, связанный с изменением порядка реакции газификации по  $H_2O$ . Максимальный прирост КПД-нетто составляет 0,1–0,6 % абс. в зависимости от режима газификации угля. Капитальные затраты на ПГУ-ВЦГ при добавке пара в пиролизном режиме газификации снижаются на 1–5 % отн., но в поточном режиме газификации – увеличиваются на 1–2 % отн.

При работе ПГУ-ВЦГ на кузнецком каменном угле рекомендуется использовать пиролизный режим паровоздушной газификации с добавкой пара в газогенератор около 0,3 кг/кг угля, что позволит увеличить КПД-нетто ПГУ-ВЦГ на 1,5–2 % абс. и уменьшить капитальные затраты на ПГУ-ВЦГ на 2,5–3 % отн. по сравнению с ПГУ с проектным режимом воздушного газогенератора *МНИ*.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования заключаются в совершенствовании модели расчета процесса газификации твердого топлива, а также в рассмотрении влияния добавки водяного пара на показатели ПГУ-ВЦГ при газификации широкого спектра топлив и обобщении полученных результатов.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Nikitin A. D. Effect of steam conversion parameters on the activated coal characteristics / A. D. Nikitin, G. I. Nikitina, S. V. Buinachev, A. F. Ryzhkov // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2015. – 020064; 0,45 п.л. / 0,3 п.л. (*Scopus, Web of Science*).

2. Nikitin A. D. Production of nanoporous sorbents by partial steam-air conversion of charcoal / A. D. Nikitin, G. I. Nikitina, A. F. Ryzhkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1128(1). – 012073; 0,4 п.л. / 0,3 п.л. (*Scopus, Web of Science*).

3. Nikitin A. D. Determining kinetic constants for reactions of zinc oxide sorbents with syngas components / Y. A. Kagramanov, A. F. Ryzhkov, V. G. Tuonogov, A. D. Nikitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1359(1). – 012091; 0,35 п.л. / 0,05 п.л. (*Scopus, Web of Science*).

4. Nikitin A. D. Effect of steam supply to the air-blown gasifier on hot syngas desulphurization / A. D. Nikitin, N. A., Abaimov, E. B. Butakov, A. P. Burdukov, A. F. Ryzhkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1369(1). – 012029; 0,45 п.л. / 0,15 п.л. (*Scopus*).

5. Nikitin A. D. Influence of the coal-derived synthesis gas composition on the thermal stability of ZnO sorbents in the desulfurization process / Y. A. Kagramanov, A. F. Ryzhkov, V. G. Tuponogov, A. D. Nikitin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1369(1). – 012030; 0,37 п.л. / 0,09 п.л. (*Scopus*).

6. Nikitin A. D. The particle size effect on the steam-air conversion process of charcoal / A. D. Nikitin, G. I. Nikitina, A. F. Ryzhkov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2174. – 020144; 0,45 п.л. / 0,35 п.л. (*Scopus*).

7. Nikitin A. D. Multiple gas-solid reactions in a porous sorbent applied to warm gas desulfurization / Y. A. Kagramanov, V. G. Tuponogov, A. F. Ryzhkov, A. D. Nikitin // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2020. – Vol. 59(29). – P. 12943–12954; 0,95 п.л. / 0,1 п.л. (*Scopus*).

8. Nikitin A. D. Investigation of multistage air-steam-blown entrained-flow coal gasification / A. D. Nikitin, N. A., Abaimov, E. B. Butakov, A. P. Burdukov, A. F. Ryzhkov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1677(1). – 012043; 0,42 п.л. / 0,15 п.л. (*Scopus*).

9. Nikitin A. D. The effect of steam on air gasification of mechanically activated coal in a flow reactor / A. D. Nikitin, A. F. Ryzhkov, E. B. Butakov, A. P. Burdukov // Thermal Science. – 2021. – Vol. 25(1A). – P. 321–330; 0,65 п.л. / 0,5 п.л. (*Scopus*).

10. Nikitin A. D. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels / A. D. Nikitin, G.S. Nyashina, A. F. Ryzhkov, P. A. Strizhak // Science of The Total Environment. – 2021. – 144909; 1,7 п.л. / 0,52 п.л. (*Scopus*).

*Патенты:*

11. Патент на полезную модель № 181126 Российская Федерация, МПК C10J 3/20. Вихревой газогенератор / А. Д. НИКИТИН, Г. И. ХУДЯКОВА, А. Ф. РЫЖКОВ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина». – № 2017141463; заявл. 28.11.17; опубл. 04.07.18.

Подписано в печать  
27.04.2021

Формат 60x84 1/16

Бумага писчая

Офсетная печать

Тираж 100

Заказ №

---

Ризография НИЧ ФГАОУ ВО «УрФУ имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19